

Поведение материалов деталей определяется значениями модуля упругости, коэффициента Пуассона, коэффициентов теплового линейного расширения и

теплопроводности (табл. 1). Коэффициент трения для рассматриваемой пары материалов $f = 0,2$ принят на основе ранее проведенных исследований [4, 5].

Таблица 1. Термомеханические свойства материалов деталей [6]

Свойство	Ед. изм.	Материал			
		ВК94-1		КУ-1	
Коэффициент линейного расширения	1/°C	При $T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-7}$	При $T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-7}$
		20÷300	60	< -60	2
		300÷500	70	-60÷50	4
				50÷100	5
		500÷900	79	100÷150	5,5
				150÷250	5,7
250÷300	5,9				
		300÷450	5,8		
Теплопроводность	Вт/(м·К)	32 (при 100 °C) 12 (при 400 °C)		1,4 (при 100 °C) 1,7 (при 400 °C)	
Модуль упругости, E	ГПа	320–360		73,6	
Коэффициент Пуассона, μ		0,2		0,17–0,19	

Детали соединения при моделировании рассматривались как упруго-деформируемые тела и разбивались на осесимметричные конечные элементы PLANE223 [7]. В зоне контакта применялись специальные контактные элементы – TARGE169 и CONTA172 [8, 9]. Контактная пара типа «поверхность – поверхность» состояла из целевой (поверхность штифта) и контактной (поверхность втулки) поверхностей. Конечно-элементная модель половины продольного сечения соединения с положительными пространственными координатами представлена на рис. 2. Начальные условия представлены величинами натягов (относительным осевым перемещением), различными методами сборки деталей соединения.

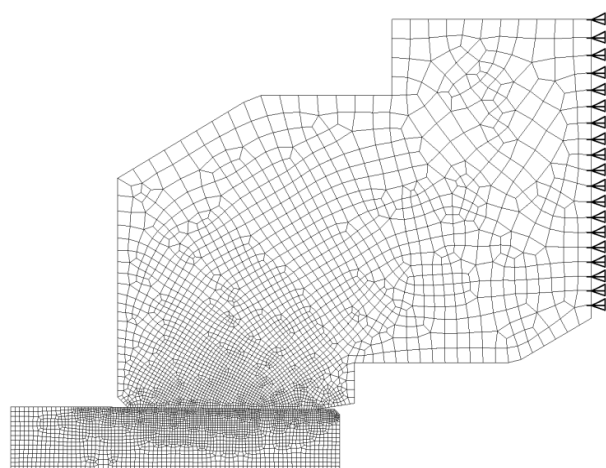


Рис. 2. Конечно-элементная модель соединения

При моделировании сборки продольно-прессовым методом на границе конической поверхности штифта и отверстия втулки задан контакт с трением (модель трения Кулона), действуют кинематические граничные условия. Втулка неподвижна: ограничение степеней свободы применяется к торцу втулки $\varnothing 35$ мм в виде нулевых значений

скорости в осевом направлении. Движение штифта при механической запрессовке обусловлено осевой скоростью $V = 0,1$ мм/с, приложенной к торцу $\varnothing 5,04$ мм.

При моделировании сборки термическим методом на начальном этапе штифт отсутствует, втулка неподвижна: ограничение степеней свободы применяется к торцу втулки $\varnothing 35$ мм в виде нулевых значений скорости в осевом направлении. Производится теплопередача внешнего контура втулки с окружающей средой (нагрев до $T = 200$ °C). Шаг итераций задается временем $\Delta t = 1$ с. На шаге итерации, соответствующем требуемому радиальному перемещению конической поверхности втулки (в среднем сечении) вследствие температурных деформаций, добавляется конический штифт ($T = 20$ °C), на границе конической поверхности штифта и отверстия втулки задается контакт с трением (модель трения Кулона) и теплообменом, действуют кинематические граничные условия. Производится теплообмен контура соединения с окружающей средой (охлаждение до $T = 20$ °C).

Численный эксперимент

Численный эксперимент проводился для различных методов формирования соединения: продольно-прессового и термического. Схема соединения к расчету представлена на рис. 3. В результате численного моделирования получены распределения нормальных давлений по длине контакта при разных натягах и условиях формирования (рис. 4, 6–8), характерные распределения интенсивности напряжений в деталях соединения (рис. 5).

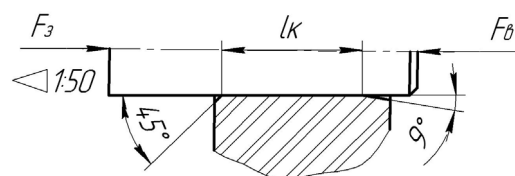


Рис. 3. Схема конического соединения

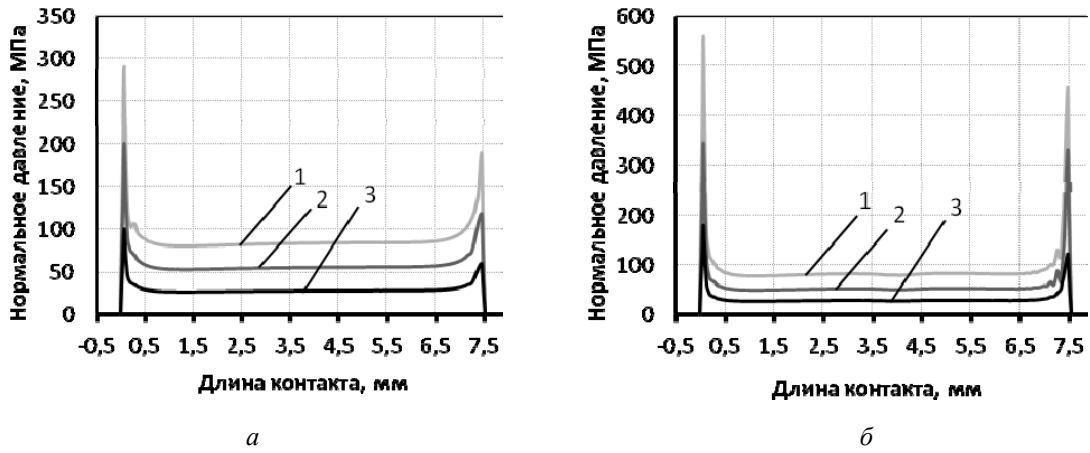


Рис. 4. Распределение нормальных давлений по длине контакта l_k при сборке продольно-прессовым (а) и термическим (б) методом с натягами (кривая 1, 2, 3)

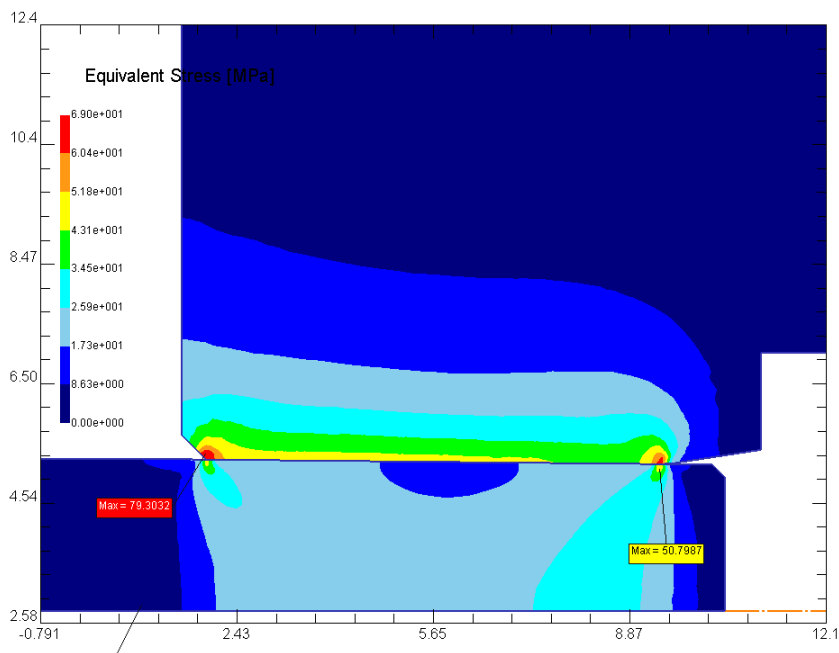


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений в соединении при расчетном натяге 2 мкм

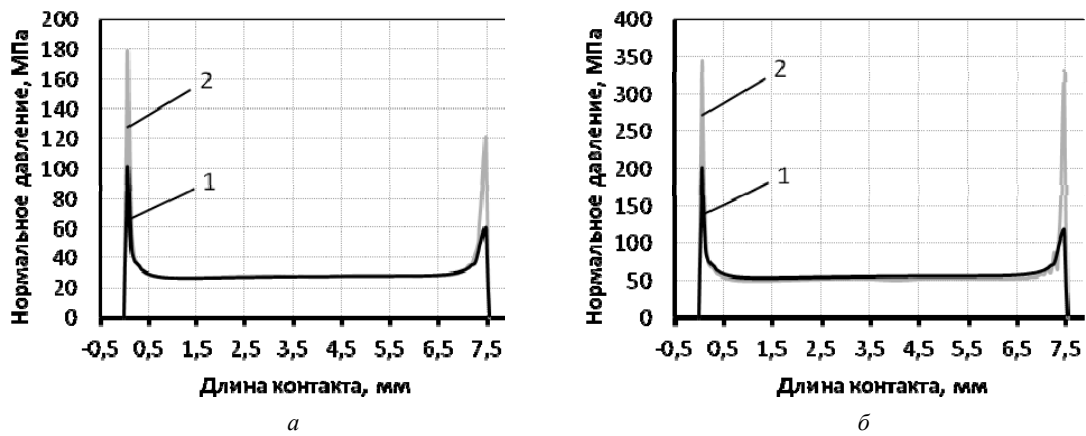
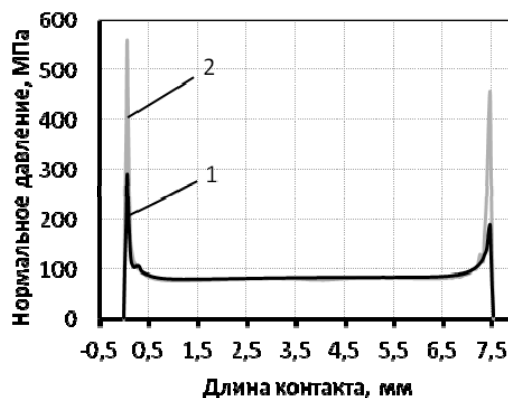
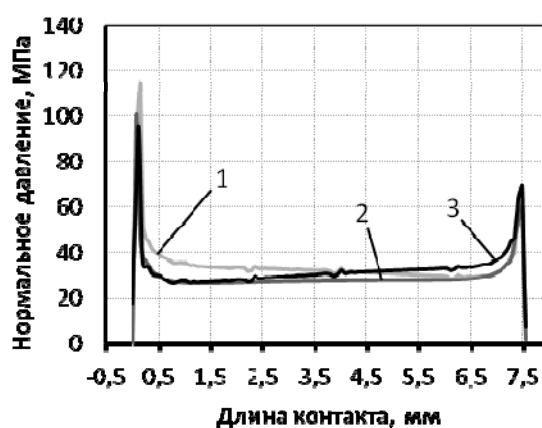


Рис. 6. Распределение нормальных давлений в сопряжении по длине контакта l_k с натягами (а), (б) при сборке продольно-прессовым (кривая 1) и термическим (кривая 2) методом (окончание на с. 47)

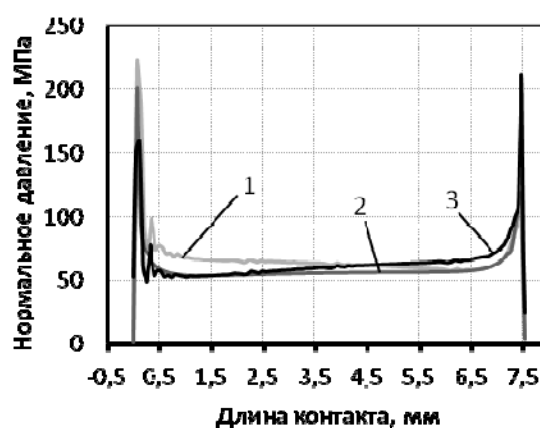


в

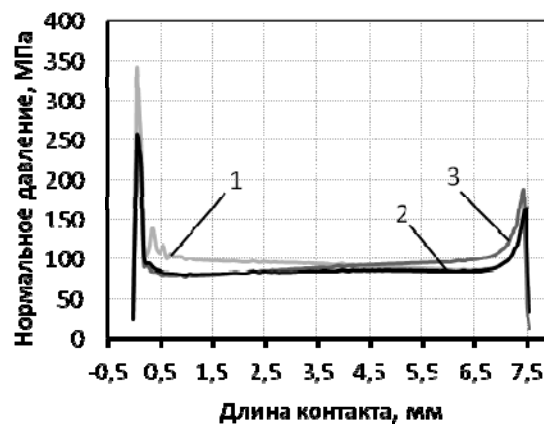
Рис. 6. Распределение нормальных давлений в сопряжении по длине контакта l_k с натягами (в) при сборке продольно-прессовым (кривая 1) и термическим (кривая 2) методом (начало на с. 46)



а



б



в

Рис. 7. Распределение нормальных давлений в сопряжении по длине контакта l_k с натягами (а), (б) и (в) при сборке продольно-прессовым методом: в процессе запрессовки – под действием силы F_3 (кривая 1), в собранном виде (кривая 2), в процессе выпрессовки – под действием силы F_B (кривая 3)

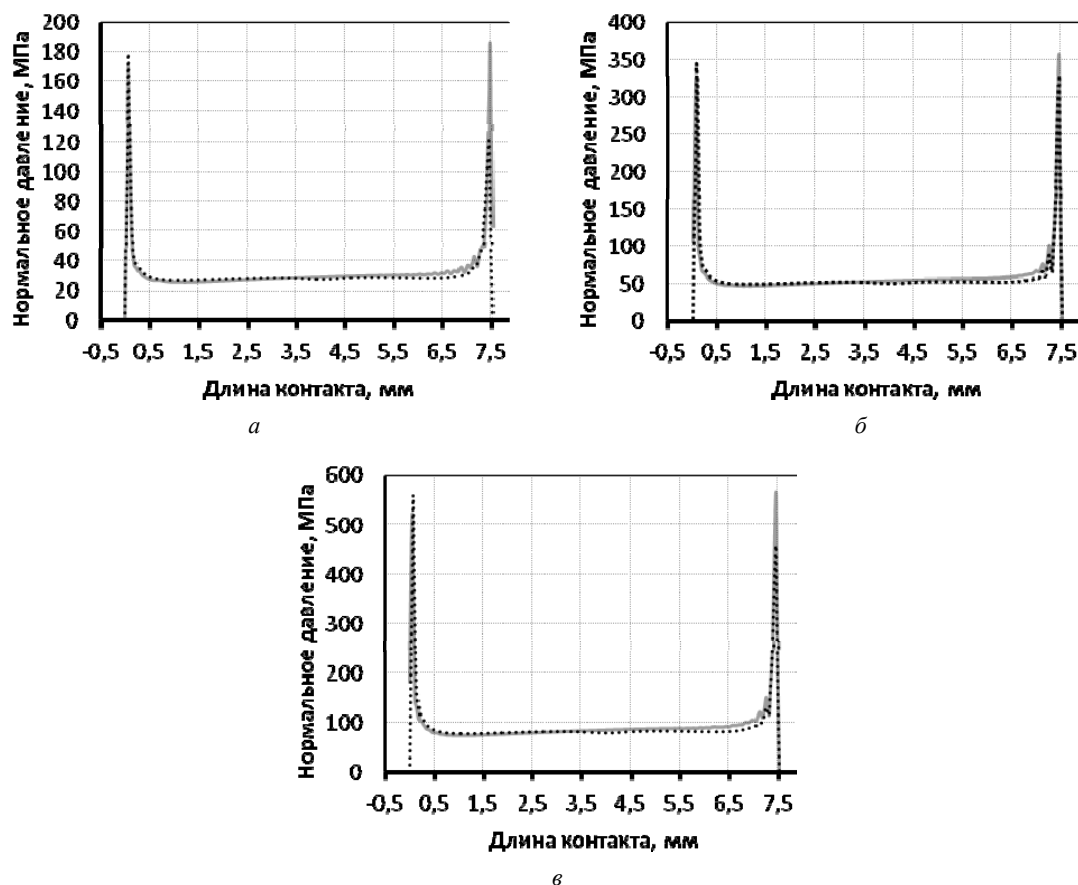


Рис. 8. Распределение нормальных давлений в сопряжении по длине контакта l_k с натягами (а), (б) и (в) при сборке термическим методом: в собранном виде (пунктирная кривая), в процессе выпрессовки – под действием силы F_B (сплошная кривая)

Таблица 2. Результаты расчетов сил запрессовки и выпрессовки, полученных по формуле (1)

Расчетный натяг, мкм	Сила запрессовки F_3 , [Н]	Сила выпрессовки F_B , [Н]		Коэффициент краевого эффекта по контактному давлению (максимальная концентрация нормального давления в контакте)	
		Термическое соединение	Механическое соединение	Термическое соединение	Механическое соединение
2	847,10	726,00	683,50	6,49	3,41
4	1668,00	1339,40	1356,00	6,74	3,45
6	2448,50	2120,00	1992,70	6,96	3,03

Из графиков на рис. 4, 6–8 видно, что уровень контактных давлений по длине сопряжения прямо пропорционален расчетному натягу и не зависит от метода формирования соединения. Однако области на границах зон контакта (далее – краевые области) имеют некоторые отличительные особенности в распределении контактных давлений, что в большей части связано с распределением осевых напряжений в соединениях, сформированным различными методами сборки.

Силу запрессовки и выпрессовки находят по зависимости, которая учитывает изменение диаметра отверстия и изменение нормального давления в контакте по длине соединения:

$$F_{3,B} = \pi (f \pm \operatorname{tg} \alpha) \int_0^{l_k} p_n(l) (D - 2l \operatorname{tg} \alpha) dl, \quad (1)$$

где D – большой диаметр конуса втулки, мм; l_k – длина контакта, мм.

Результаты расчетов по формуле (1) представлены в табл. 2.

Натурный эксперимент

При расчетах конических соединений с натягом пользуются расчетной величиной натяга, отличной от измеренной, как правило, на величину смятия микронеровностей [10, 11]:

$$\delta_{\text{расч}} = \delta - \Delta, \quad (2)$$

где δ – измеряемый (действительный) натяг, мкм; $\delta_{\text{расч}}$ – расчетный натяг, мкм; Δ – поправка на смятие микронеровностей при запрессовке деталей, мкм.

В большинстве источников величину смятия выражают через параметры шероховатости, волнистости, отклонения формы поверхностей сопряжения [12–14]. Широкое распространение при оценке величины поправки на смятие микронеровностей при

запрессовке металлических деталей получила следующая зависимость:

$$\Delta = K_r (R_{a_1} + R_{a_2}), \quad (3)$$

где K_r – эмпирический коэффициент, зависящий от физико-механических свойств деталей соединения и величины контактного давления в сопряжении, по данным различных литературных источников [15–17] для соединений с натягом традиционных в машиностроительной практике металлических деталей $K_r \approx 3...5$; R_{a_1} , R_{a_2} – параметры шероховатостей поверхности вала и втулки, мкм.

В работе [18] показано, что параметр шероховатости наиболее сильно влияет в зоне малых диаметров в соединениях с небольшими натягами (величина параметров шероховатости соизмерима с натягом в сопряжении деталей). Также стоит отметить, что большинство исследований, посвященных снижению расчетных натягов вследствие смятия микронеровностей, касалось соединений традиционных для данного вида сопряжений материалов – сталей, сплавов цветных металлов. Следовательно, общепринятые значения коэффициента K_r для определения величины поправки натяга, вызванной разрушением микронеровностей поверхностного слоя, для хрупких малоразмерных деталей могут оказаться не прием-

лемыми. Одной из задач натурального эксперимента является оценка величины сглаживания микронеровностей Δ при сборке с натягом рассматриваемого соединения для ее последующего применения при сопоставлении результатов численного моделирования и натуральных экспериментов.

Описание экспериментальной установки, схемы измерений и образцов, используемых при проведении натурального эксперимента, представлено в работе [19]. Параметры шероховатости конических поверхностей образцов контролировались в соответствии с ГОСТ 2789–73 и составили $R_{a_1} = 0,15$ для штифта и $R_{a_2} = 0,46$ для втулки.

С достаточной для практики точностью найдем Δ из графической зависимости натяга от силы запрессовки $\delta = f(F_3)$ (рис. 9) продолжением линейного участка кривой до пересечения с осью ординат. Зависимость натяга от силы запрессовки исследуемых образцов, полученная в результате обработки данных натуральных экспериментов методом наименьших квадратов, имеет вид:

$$\delta = 1,111 + 0,002235 F_3, \quad (4)$$

где δ – величина измеренного (действительного) натяга, мкм; F_3 – сила запрессовки, Н.

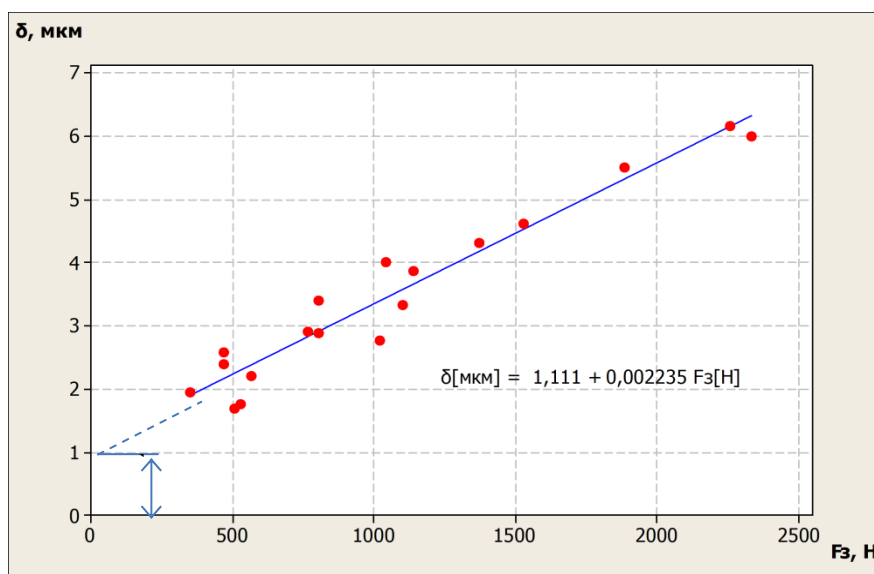


Рис. 9. Зависимость натяга от приложенной силы F_3 , полученная в результате статистической обработки данных натуральных экспериментов по механической запрессовке

Стандартное отклонение составило $S = 0,36347$, квадрат коэффициента корреляции $R^2 = 0,937$. Таким образом, для исследуемых образцов примем $\Delta = 1,11$ мкм. При подстановке в (2) для рассматри-

ваемого соединения получим следующее значение коэффициента¹: $K_r = \frac{\Delta}{R_{a_1} + R_{a_2}} = \frac{1,11}{0,15 + 0,46} = 1,82$.

¹ Данное значение является ориентировочным и требует большего числа экспериментов на каждом уровне при построении доверительных интервалов с требуемой вероятностью.

На рис. 10 представлены графики зависимости сил запрессовки F_3 от натягов деталей прессового

соединения, полученные в результате расчета и натурного эксперимента.

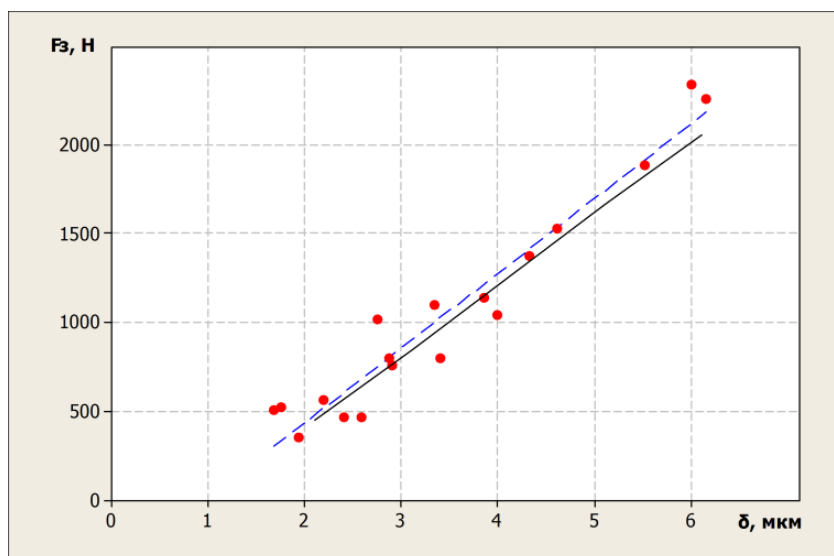


Рис. 10. Зависимости сил запрессовки F_3 от натягов деталей прессового соединения, полученные в результате численного эксперимента (сплошная линия) и в результате статистической обработки данных натурного эксперимента (штриховая линия)

Максимальные расхождения зависимостей составили 5 % при натяге $\delta = 6$ мкм, что можно объяснить различными неучтенными факторами при построении математической модели, такими как отклонения формы конуса от номинальной в реальных образцах, отклонения реальных характеристик материалов от используемых в модели, изменение величины коэффициента трения от нормального давления в реальном сопряжении.

Выводы

По результатам численного моделирования установлена зависимость сил запрессовки и выпрессовки конического штифта относительно втулки для различных методов формирования соединения. Нагрузочная способность конического соединения, сформированного термическим и продольно-прессовым методом сборки, отличается незначительно – в пределах 6 %. Проведен натурный эксперимент, который позволил оценить соотношение между расчетной и измеренной (фактической) величиной натяга в рассматриваемом коническом соединении стеклянного штифта и керамической втулки. Полученный коэффициент при определении величины поправки натяга от изменения высоты микронеровностей K_r для рассматриваемого соединения и величин натягов меньше общепринятого для соединений с натягом металлических деталей в 1,7–2,8 раза, что обусловлено различными механизмами деформирования микронеровностей в зоне контакта. Максимальное отличие сил запрессовки, полученное в результате численного моделирования и натурного эксперимента, для рассматриваемого диапазона натягов составило 5 %.

Библиографические ссылки

1. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.
2. Балацкий Л. Т. Прочность прессовых соединений. – Киев : Техника, 1982. – 152 с.
3. Фаттеев Ф. Ф. Разработка методов повышения нагрузочной способности и расчета конических соединений : дис. ... канд. техн. наук. Спец.: 01.02.06. Устинов, 1985. – 136 с.
4. Лекомцев П. В., Абрамов И. В. Исследование нагрузочной способности конического соединения деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 22–23 апреля 2015 года. – Электрон. дан. (1 файл : 33,2 Мб.). – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, ИННОВА, 2015. – 1010 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Acrobat reader 6.0 и выше – С. 193-200. – ISBN 978-5-9906108-6-6.
5. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П. Керамика для машиностроения. – М. : Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.
6. Абрамов И. В., Лекомцев П. В. Экспериментальные исследования термостойкости конического соединения деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 25–28.
7. ANSYS 12.1 Academic Research. ANSYS Element reference // ANSYS, Inc. 2009.
8. Там же.
9. Басов К. А. ANSYS: Справочник пользователя. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
10. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

11. Балацкий Л. Т. Прочность прессовых соединений. – Киев : Техника, 1982. – 152 с.
12. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Указ. соч.
13. Yang G. M., Coquille J. C., Fontaine J. F., Lambertin M. Contact pressure between two rough surfaces of a cylindrical fit // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Т. 123. – Рр. 490–497.
14. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
15. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Указ. соч.
16. Yang G. M., Coquille J. C., Fontaine J. F., Lambertin M. Contact pressure between two rough surfaces of a cylindrical fit // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Т. 123. – Рр. 490–497.
17. Суслов, А. Г. Указ. соч.
18. Мартынов А. П., Зенкин А. С., Васильев А. П. Управление качеством неподвижных соединений за счет нормирования конструктивно-технологических параметров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 9 (122). – С. 8–14.
19. Лекомцев П. В., Абрамов И. В. Указ. соч.

* * *

Abramov I.V., DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU;
Lekomtsev P.V., Senior Lecturer, Kalashnikov ISTU;
Trefilov N.A., Master's degree student, Kalashnikov ISTU

Computer research of load-carrying capacity for tapered interference fit made of brittle nonmetallic parts

The article presents the results of computer investigations for load-carrying capacity (static strength) of tapered joint of parts made of quartz glass and technical ceramics, assembled by thermal and longitudinally-pressing method. The finite element method was used to analyze the stress state in the details of tapered joint, to predict normal pressure distributions along the length of the contact for different assembly methods, extraction and pressing forces of the conical pin in the sleeve. Natural experiment of assembling glass pin with ceramic sleeve allowed obtaining the ratio of the measured and nominal values of interference.

Keywords: tapered interference fit, load-carrying capacity, nominal interference, finite element model, longitudinally-press assembly method, thermal assembly method, technical ceramics, quartz glass.

Получено: 12.08.15